饲粮中添加复合酶制剂对奶牛瘤胃发酵、营养物质表观消化率和生产性能的影响

赵连生[1,2] 王有月[3] 陈雅坤[2] 卜登攀[2] 刘 威[2] 郭江鹏[4*]

（1.甘肃农业大学动物科学技术学院，甘肃 730070；2.中国农业科学院北京畜牧兽医研究所，动物营养学国家重点实验室，北京 100193；3.北京市畜牧业环境监测站，北京 102200；4.北京市畜牧总站，北京 100107）

摘 要：本试验旨在研究饲粮中添加不同剂量的复合酶制剂对奶牛瘤胃发酵、营养物质表观消化率、血清生化指标及生产性能的影响。试验选取体重、胎次、泌乳天数和产奶量相同或相近的泌乳早期荷斯坦奶牛 32 头，采用随机区组试验设计分为 4 组，每组 8 头。对照组饲喂不添加复合酶制剂的基础饲粮，试验组分别饲喂在基础饲粮中添加 0.10%、0.15%和 0.20%复合酶制剂的试验饲粮，预试期 10 d，正试期 56 d。结果表明：1）与对照组相比，饲粮中添加 0.15%复合酶制剂显著提高瘤胃液总挥发性脂肪酸含量（$P<0.05$）；添加复合酶制剂对瘤胃液乙酸含量有一定提高作用（$P=0.08$），而对其他挥发性脂肪酸、氨态氮和微生物蛋白含量无显著影响（$P>0.05$），有降低 pH 的趋势（$P=0.08$）。2）与对照组相比，饲粮中添加复合酶制剂能显著提高干物质和中性洗涤纤维的表观消化率（$P<0.05$）；添加 0.20%复合酶制剂能显著提高有机物的表观消化率（$P<0.05$）。3）与对照组相比，饲粮中添加复合酶制剂对血清总蛋白含量有增加趋势（$P=0.09$），对尿素氮含量有降低趋势（$P=0.07$），而对其他血清生化指标无显著影响（$P>0.05$）。4）与对照组相比，饲粮中添加 0.10%和 0.15%复合酶制剂能显著提高饲料转化率（$P<0.05$），0.10%组和 0.15%组 3.5%乳脂校正乳产量分别提高 3.88 和 4.27 kg/d（$P<0.05$），0.15%组乳脂率提高 12.70%（$P<0.05$）。在本试验

收稿日期：2018-03-26

基金项目：中国农业科学院科技创新工程协同创新任务（CAAS-XTCX2016011-01）;北京市奶牛产业创新团队（BAIC06-2018）

作者简介：赵连生 (1979-)，男，北京人，博士研究生，从事粗饲料营养与评价研究。E-mail: aaronann@163.com

*通信作者：郭江鹏，高级畜牧师，E-mail: guojp72@163.com

条件下，饲粮中添加复合酶制剂有助于提高饲料转化率、瘤胃发酵和生产性能，且添加量为0.15%时效果较好。

关键词：复合酶制剂；奶牛；表观消化率；生产性能；血清生化指标

中图分类号：S832 文献标识码： 文章编号：

在奶牛生产中，较低的饲粮利用率一直是限制奶牛生产性能提高的重要因素[1]。外源复合酶制剂是一类从生物中提取、具有酶特性的物质，它以绿色、安全、高效等优点迅速成为饲用添加剂领域的研究热点。酶制剂最初应用于单胃动物（如猪、鸡等），有利于改善其饲粮利用率和生产性能[2-3]，而在反刍动物上的应用研究起步相对较晚，起初研究者认为酶制剂会受到瘤胃内微生物的破坏而失活。近年来的研究发现，外源酶能够在瘤胃内稳定存在，这再次引起研究者在反刍动物上使用外源酶制剂的兴趣[4]。有研究结果表明，添加外源酶制剂有利于提高饲粮的消化率[5]，增加奶牛产奶量[6]及乳品质[7]。但也有报道认为酶制剂对奶牛生产性能无显著影响[8]。酶制剂的应用效果与酶制剂的种类、添加方式、剂量和生产方法等因素有关。单一酶制剂由于功能单一，所以效果不佳，现在多用复合酶制剂。目前复合酶制剂在奶牛上的研究较多的是降解植物细胞壁成分的纤维素酶和木聚糖酶[1]，有关纤维素酶、木聚糖酶、甘露聚糖酶、β-葡聚糖酶、果胶酶和中性蛋白酶共同制成的复合酶制剂的应用效果研究较少。本试验采用的纤维素酶是经过生物工程改造后的二代里氏木霉，再配合木聚糖酶、甘露聚糖酶、β-葡聚糖酶、果胶酶和中性蛋白酶制成复合酶制剂，研究该复合酶制剂对奶牛瘤胃发酵、营养物质表观消化率、血清生化指标和生产性能的影响，同时探讨其在泌乳奶牛饲粮中的适宜添加量，为其在生产中应用及作用机理研究提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料

本试验所用外源复合酶制剂由宁夏夏盛实业有限公司提供，主要成分包括纤维素酶 15

000 U/g、木聚糖酶 100 000 U/g、β-葡聚糖酶 280 000 U/g、甘露聚糖酶 2 500 U/g、果胶酶 60 000 U/g 和中性蛋白酶 2 000 U/g。

1.2　试验动物及试验设计

根据体重、胎次、泌乳天数和产奶量相同或相近的原则，选择 32 头健康荷斯坦泌乳早期奶牛，采用随机区组试验设计分为 4 组，每组 8 头，每头即 1 个重复，对照组饲喂不添加复合酶制剂的基础饲粮，试验组分别饲喂在基础饲粮中添加 0.10%、0.15%和 0.20%复合酶制剂的试验饲粮。先将复合酶制剂根据试验设计的添加量与精料混合均匀，再与粗饲料混合均匀制成全混合日粮饲喂奶牛。试验预试期 10 d，正试期 56 d。试验牛基本情况见表 1。

表 1　试验牛基本情况

Table 1　Basic information of dairy cows

组别 Groups	胎次 Parity	泌乳天数 Lactation day/d	体重 Body weight/kg	产奶量 Milk yield/（kg/d）
对照 Control	头胎	30.11±9.87	548.25±31.54	33.84±4.38
0.10%	头胎	27.89±9.58	550.33±27.06	33.58±4.05
0.15%	头胎	28.67±10.55	556.89±31.90	33.38±4.11
0.20%	头胎	30.22±8.71	553.78±26.82	33.18±4.82

1.3　试验饲粮与饲养管理

基础饲粮根据高产奶牛全混合日粮的营养水平需求，参照 NRC（2001）奶牛饲养标准配制，其组成及营养水平见表 2。试验采用带卧床的散栏式饲养，自由采食和饮水。饲喂采用荷兰 Insentec 自动采食系统，每天分别在 07:30、14:30 各饲喂 1 次全混合日粮。挤奶采用美国 BouMatic 自动挤奶系统，每天分别在 06:30、14:00 和 20:30 各挤奶 1 次。

表 2　基础饲粮组成及营养水平（干物质基础）

Table 2　Composition and nutrient levels of the basal diet （DM basis）　%

项目 Items	含量 Content
原料 Ingredient	
全株玉米青贮 Whole-plant corn silage	18.85
燕麦草 Oat grass	4.01
苜蓿 Alfalfa	13.76
糖蜜 Molasses	1.31
豆粕 Soybean meal	11.43
膨化大豆 Expanded soybean	2.04
压片玉米 Steam-flaked corn	20.01
大豆皮 Soybean hulls	11.28
棉籽 Cottonseed	3.83
玉米 Corn	3.73
过瘤胃脂肪 Rumen-protected fat[1)]	3.39
酵母培养物 Yeast culture[2)]	0.41
防霉剂 Mildew-proof agent[3)]	0.14
石粉 Limestone	0.56
食盐 NaCl	0.83
磷酸氢钙 $CaHPO_4$	1.08
小苏打 $NaHCO_3$	1.63
碳酸氢钾 $KHCO_3$	0.69
氧化镁 MgO	0.21
预混料 Premix[4)]	0.81
合计 Total	100.00

营养水平 Nutrient levels[5]	
干物质 DM	52.01
泌乳净能 NE_L/(Mcal/kg)	1.81
粗蛋白质 CP	17.56
中性洗涤纤维 NDF	28.60
酸性洗涤纤维 ADF	19.41
粗脂肪 EE	5.80
钙 Ca	0.80
磷 P	0.45
粗灰分 Ash	8.99

[1] 过瘤胃脂肪购自德国百事美公司。Rumen-protected fat was brought from Berg+Schmidt Co., Germany.

[2] 酵母培养物购自美国达农威公司。Yeast culture was brought from Diamond V Co., USA.

[3] 防霉剂购自奥地利百奥明公司。Mycotoxin removement agent was brought from Biomin Co., Austria.

[4] 预混料为每千克饲粮提供 The premix provided the following per kg of the diet: VA 300 000 IU,VD_3 210 000 IU,VE 3 000 IU,Ca 20 g,Cu 0.5 g,Zn 3.0 g,Mn 2.1 g,I 40 mg,Se 30 mg,Co 10 mg。

[5] 泌乳净能为计算值，根据 NRC(2001)[9]计算，其余均为实测值。NE_L was a calculated value according to NRC (2001)[9], while the others were measured values.

1.4 样品采集及指标测定

1.4.1 采食量和相关指标测定

采用 Insentec 自动采食系统自动记录每天采食量。试验期每周采集 2 次饲粮，测定饲粮中干物质（DM）含量，根据每天记录的采食量、产奶量，计算干物质采食量（DMI）和饲料转化率（FCR）。参照国家标准[10-13]的方法测定 DM、粗蛋白质（CP）、中性洗涤纤维（NDF）和酸性洗涤纤维（ADF）和粗灰分（Ash）含量，根据粗灰分含量计算有机物（OM）含量。

1.4.2 瘤胃液采集和相关指标测定

正试期第 54 天，于晨饲后 1 h，使用胃管式瘤胃液采样器（MDW-15，上海硅狄公司）从口腔采集瘤胃液 100 mL，经 4 层纱布过滤后，立即采用 pH 计（SevenGo™ pH-SG2 型，上海绽兴仪器科技有限公司）测定 pH，然后分装于 10 mL 离心管中，置于-20 ℃保存，用于测定瘤胃液中氨态氮（NH_3-N）、微生物蛋白（MCP）和挥发性脂肪酸（VFA）含量。NH_3-N 含量采用苯酚-次氯酸钠比色法[14]在酶标仪（Thermo Electron Varioskan Flas，上海辅泽商贸有限公司）上测定，MCP 含量采用嘌呤碱基法[15]在酶标仪上测定，VFA 含量采用气相色谱仪（Agilent-6890N 型，北京北分天普仪器技术有限公司）测定。

1.4.3 血样采集和相关指标测定

正试期第 54 天，于晨饲前 1 h，使用真空采血管尾静脉采血 10 mL，将采集的血样放入离心机（Himac-CR22G 型）2 000×*g* 离心 10 min，用吸管取上层血清于 2 mL 离心管中，置于-20 ℃保存。血清样品送至华英生物科技有限公司采用迈瑞 BS300 型生化分析仪（北京迈润医疗医疗器械有限公司）测定尿素氮(UN)、葡萄糖(GLU)、肌酸酐(CR)、总蛋白（TP）、白蛋白（ALB）、总胆固醇(TC)和β-羟丁酸（BHAH）含量。

1.4.4 产奶量和乳成分测定

采用美国 BouMatic 自动挤奶系统记录产奶量，并计算 3.5%乳脂校正乳产量。正试期每周采集 1 次新鲜奶样，早、中、晚按 4:3:3 比例采集 50 mL，加 1 粒重铬酸钾防腐，送北京市奶牛中心，采用多功能乳成分分析仪（MilkoScan 605，Foss Electric，Hillerod，丹麦）测定乳糖率、乳脂率、乳蛋白率及体细胞数（SSC）。

1.4.5 粪样采集和营养物质表观消化率测定

正试期第 54～57 天进行奶牛消化试验。采用直肠采粪法，连续采集粪样 12 次，采集时间点为第 54 天的 08：00、14：00、20：00，第 55 天的 02：00、10：00、16：00、22：00，第 56 天的 04：00、12：00、18：00、24：00，第 57 天的 06：00。采样结束后，将每头牛

的各个时间点粪样混合，缩成 2 份样品，每份 500 g，一份立即用 10%的盐酸进行固氮，用于 CP 含量测定。消化试验结束后将每头牛 3 d 的样品混合，缩样，之后置于 65 ℃烘箱里烘至恒重，再放入空气中回潮，粉碎后过 40 目筛，即得风干样品，用于营养物质表观消化率的测定。营养物质表观消化率以酸不溶灰分（AIA）为内标，采用内源指示剂法[16]测定 DM、CP、NDF、ADF 和 OM 的表观消化率。

某营养物质表观消化率（%）=100[1-(A×D/B×C)]，

式中：A 为饲粮中 AIA 含量（g/kg）；B 为饲粮中该营养物质含量（g/kg）；C 为粪中 AIA 含量（g/kg）；D 为粪中该营养物质含量（g/kg）。

1.5 统计分析

试验数据利用 SAS 9.2 软件包中的 PROC MIXED 程序进行方差分析。添加量对试验结果的影响进行线性和二次相关关系显著性检验，试验结果以最小二乘均值表示。P＜0.05 为差异显著，P＜0.01 为差异极显著。

2 结果与分析

2.1 复合酶制剂对奶牛瘤胃发酵的影响

由表 3 可知，与对照组相比，饲粮中添加 0.15%复合酶制剂能显著提高总挥发性脂肪酸（TVFA）含量（P＜0.05）；添加复合酶制剂有降低 pH（P=0.09）和提高乙酸含量（P=0.08）的趋势。此外，与对照组相比，丙酸、丁酸、戊酸、异丁酸、异戊酸、氨态氮和 MCP 含量均未受到复合酶制剂的显著影响（P＞0.05），但 MCP 含量有线性增加趋势（P=0.05）。

表 3 复合酶制剂对奶牛瘤胃发酵的影响

Table 3 Effects of complex enzyme preparation on rumen fermentation of dairy cows

项目 Items	组别 Groups				SEM	P 值 P-value	线性 Linear	二次 Quadratic
	对照 Contro	0.10%	0.15%	0.20%				

	1							
总挥发性脂肪酸 TVFA/(mmol/L)	97.87[b]	102.12[ab]	104.07[a]	101.78[ab]	0.33	0.04	0.60	0.21
乙酸 Acetate/(mmol/L)	63.74	67.32	68.87	66.69	0.26	0.08	0.91	0.11
丙酸 Propionate/(mmol/L)	19.72	20.21	20.35	20.49	0.15	0.36	0.71	0.12
丁酸 Butyrate/(mmol/L)	10.72	10.74	11.01	10.71	0.04	0.44	0.45	0.40
戊酸 Valerate/(mmol/L)	1.33	1.44	1.44	1.47	0.23	0.70	0.71	0.15
异丁酸 Isobutyrate/(mmol/L)	0.85	0.86	0.88	0.89	0.01	0.76	0.69	0.45
异戊酸 Isovalerate/(mmol/L)	1.51	1.55	1.52	1.53	0.03	0.64	0.65	0.39
乙酸/丙酸 A/P	3.23	3.33	3.38	3.25	0.02	0.61	0.90	0.30
氨态氮 NH_3-N/(mg/dL)	15.19	13.17	14.20	13.97	1.05	0.58	0.40	0.37
微生物蛋白 MCP/(mg/dL)	1.58	1.57	1.68	1.69	0.05	0.18	0.05	0.85
pH	6.69	6.51	6.55	6.54	0.07	0.09	0.49	0.32

同行数据肩标不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。下表同。

In the same row, values with different small letter superscripts mean significant differences (P<0.05). The same below.

2.2 复合酶制剂对奶牛营养物质表观消化率的影响

由表 4 可知，与对照组相比，饲粮中添加复合酶制剂能显著提高 DM、NDF 表观消化率（P<0.05），随着复合酶制剂添加量的增加，DM、OM 和 NDF 表观消化率呈线性增加（P<0.05），但各试验组之间 DM、OM 和 NDF 表观消化率差异不显著（P>0.05）；复合酶制剂虽未能显著影响 CP 和 ADF 表观消化率（P>0.05），但 CP 表观消化率有线性增加趋

势（P=0.05）。

表 4　复合酶制剂对奶牛营养物质表观消化率的影响

Table 4　Effects of complex enzyme preparation on apparent digestibility of nutrients of dairy cows　%

项目 Items	组别 Groups				SEM	P 值 P-value	线性 Linear	二次 Quadratic
	对照 Control	0.10%	0.15%	0.20%				
干物质 DM	70.37^{b}	72.29^{a}	73.54^{a}	73.98^{a}	1.08	0.04	0.03	0.83
有机物 OM	70.22^{b}	72.39^{ab}	72.71^{ab}	73.89^{a}	1.07	0.04	0.03	0.65
粗蛋白质 CP	80.09	81.94	82.92	83.65	1.25	0.25	0.05	0.66
中性洗涤纤维 NDF	61.94^{b}	68.19^{a}	67.58^{a}	68.64^{a}	1.74	0.04	0.03	0.36
酸性洗涤纤维 ADF	56.92	61.55	60.14	62.63	1.84	0.18	0.08	0.57

2.3　复合酶制剂对奶牛血清生化指标的影响

由表 5 可知，与对照组相比，饲粮中添加复合酶制剂有提高血清中 TP 含量（P=0.09）和降低 UN 含量（P=0.07）的趋势；随着复合酶制剂添加量的增加，血清 TP 含量呈线性增加（P<0.05），UN 含量呈线性降低（P<0.05），CR 含量有线性增加的趋势（P=0.09）。

表 5　复合酶制剂对奶牛血清生化指标的影响

Table 5　Effects of complex enzyme preparation on serum biochemical indices of dairy cows

项目 Items	组别 Groups				SEM	P 值 P-value	线性 Linear	二次 Quadratic
	对照 Control	0.10%	0.15%	0.20%				

总蛋白 TP/(g/L)	74.12	76.51	78.6	77.69	1.23	0.09	0.03	0.20
白蛋白 ALB/(g/L)	33.51	34.63	34.76	34.86	0.82	0.51	0.32	0.50
尿素氮 UN/(mmol/L)	4.30	4.13	4.03	4.07	0.07	0.07	0.02	0.16
肌酸酐 CR/(g/L)	85.43	86.33	89.30	88.01	1.36	0.21	0.09	0.41
β-羟丁酸 BHBA/(mmol/L)	0.54	0.59	0.64	0.61	0.04	0.22	0.11	0.21
总胆固醇 TC/(mmol/L)	3.85	3.84	3.76	3.80	1.02	0.94	0.23	.042
葡萄糖 GLU/(mmol/L)	3.37	3.39	3.42	3.41	0.04	0.86	0.47	0.84

2.4 复合酶制剂对奶牛生产性能的影响

图 1 表示试验 0～8 周内 3.5%乳脂校正乳产量的变化趋势。在整个试验期间，试验组 3.5%乳脂校正乳产量均高于对照组，其中 0.15 组 3.5%乳脂校正乳产量变化趋势较稳定。

由表 6 可知，与对照组相比，0.10%组和 0.15%组的 3.5%乳脂校正乳产量提高了 3.88 和 4.27 kg/d（$P<0.05$），0.10%组和 0.15%组的 FCR 提高了 6.86%和 8.00%（$P<0.05$），0.15%组的乳脂率提高了 12.70%（$P<0.05$）；随着复合酶制剂添加量的增加，FCR、3.5%乳脂校正乳产量和乳脂率呈二次变化（$P<0.05$）。

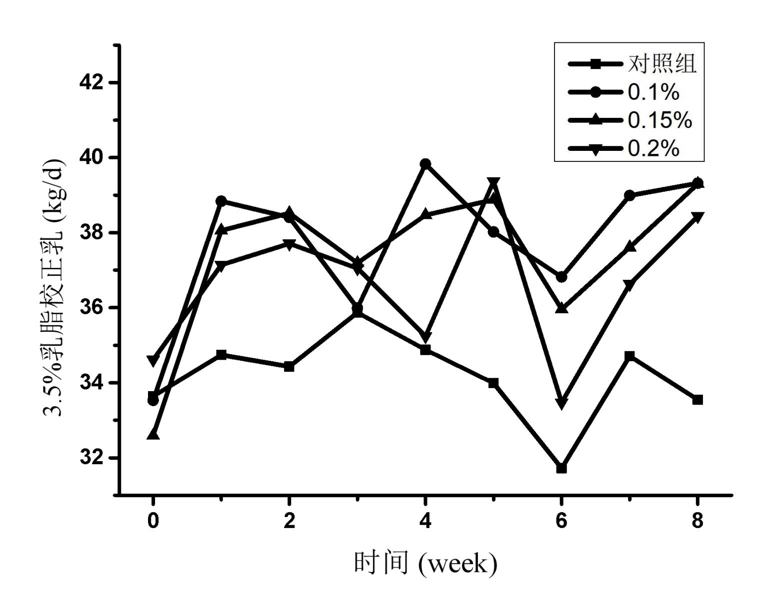


图 1　各组中 3.5%乳脂校正乳产量的变化趋势

Fig.1　Change trend of 3.5% milk fat correction milk yield in different groups

表 6　复合酶制剂对奶牛生产性能的影响

Table 6　Effects of complex enzyme preparation on performance of daily cows

项目 Items	组别 Groups				SEM	*P* 值 *P*-value	线性 Linear	二次 Quadratic
	对照 Control	0.10%	0.15%	0.20%				
干物质采食量 DMI/(kg/d)	18.90	20.17	19.62	21.52	0.52	0.06	0.10	0.83
饲料转化率 FCR	1.75[b]	1.87[a]	1.89[a]	1.79[ab]	0.07	0.01	0.43	0.03
产奶量 Milk yield/(kg/d)	33.52	35.70	35.56	35.98	1.51	0.09	0.22	0.61
3.5%乳脂校正乳产量 3.5% FCM yield/(kg/d)	34.16[b]	38.04[a]	38.43[a]	36.42[ab]	1.05	0.04	0.33	0.04
乳脂率 Milk fat rate/%	3.70[b]	3.97[ab]	4.17[a]	3.66[b]	0.21	0.03	0.37	0.04
乳蛋白率 Milk protein rate/%	3.10	3.09	3.20	3.06	0.06	0.31	0.97	0.24

乳糖率 Lactose rate/%	5.14	5.10	5.18	5.18	0.04	0.39	0.23	0.62
体细胞数 SCC/（$\times 10^4$/mL）	4.79	5.62	4.77	3.55	0.11	0.61	0.32	0.39

饲料转化率=3.5%乳脂校正乳产量/干物质采食量。FCR=3.5% FCM yeild/DMI.

3 讨 论

3.1 复合酶制剂对奶牛瘤胃发酵的影响

VFA 是饲粮中碳水化合物在瘤胃发酵的主要产物，不仅是机体所需碳架的主要来源，也是机体维持生长、繁殖和泌乳的重要能量来源，可为泌乳奶牛提供所需能量的 70%～80%。因此，VFA 含量变化可在一定程度上反映瘤胃发酵类型和反刍动物对饲粮中营养物质的吸收利用情况。贾仙宝[17]在饲粮中添加外源纤维素酶饲喂奶牛，结果发现添加 0.1%纤维素酶显著提高瘤胃 VFA 含量；李朝云[18]报道，在奶牛高粗饲粮和中粗饲粮中添加纤维素酶，瘤胃 VFA 含量要高于高精饲粮和对照组；陈宇[19]通过对湖羊瘤胃发酵的研究，发现在饲粮中添加 20 mg/kg 外源酶时效果最佳，瘤胃 VFA 含量比对照组显著增加了 37%；Arriola 等[20]发现，添加纤维酶使奶牛瘤胃液中 TVFA 含量增加，乙酸/丙酸下降。因此，酶制剂对瘤胃 VFA 产量的作用效果与酶制剂的种类、添加量、饲粮精粗比和试验动物种类等因素有关。在本研究中发现，饲粮中添加 0.15%复合酶制剂能显著影响 TVFA 含量，且乙酸含量也有增加趋势，这与前人研究结果一致[17]。

NH_3-N 是瘤胃微生物合成 MCP 和机体蛋白质的主要原料，其含量可反映在特定饲粮下蛋白质降解与合成间所形成的一个平衡状态。NH_3-N 和 MCP 含量也反映了瘤胃微生物对饲粮营养物质利用的程度。一般认为，添加酶制剂通过增加瘤胃微生物的数量来促进瘤胃发酵[21]。呼和等[22]发现，外源酶制剂显著提高奶牛瘤胃微生物菌群数量，如黄化瘤胃球菌、白色瘤胃球菌、溶纤维丁酸弧菌、产琥珀酸丝状杆菌和反刍兽真细菌等的数量；Yang 等[23]研究发现，在奶牛饲粮中添加纤维素酶和木聚糖酶，不但提高了 NDF 的消化率，而且 MCP 产量也相应增加，这与本试验结果一致。

瘤胃 pH 是反映瘤胃发酵的综合指标，适宜 VFA 形成的 pH 为 6.2～6.6；适宜 NH_3-N 利用的 pH 为 5.7～6.2[17]。在本试验中，瘤胃液 pH 有下降趋势，这可能由于添加复合酶制剂促进 TVFA 的形成，导致瘤胃液 pH 降低，但各组 pH 均处于正常范围内。

3.2　复合酶制剂对奶牛营养物质表观消化率的影响

有研究表明，复合酶制剂不仅可以增加瘤胃中纤维降解酶、木聚糖酶和甘露聚糖酶等酶的活性，还可增加小肠中纤维降解酶和木聚糖酶的活性[24-25]。因此，消化道内酶活性的增加为饲粮中营养物质的利用提供了保障。徐学文等[26]报道，饲粮中添加 4 种商业复合酶制剂饲喂奶牛均能促进 DM 和 CP 的消化，并且在一定程度上有利于提高 NDF 和 ADF 的消化率；Knowlton 等[27]在奶牛饲粮中添加以纤维素酶和植酸酶为主的酶制剂，结果发现酶制剂能够减少粪中 DM、NDF、ADF、氮（N）和磷（P）的排放，从而提高饲粮营养物质的消化率；Peters 等[8]研究发现，在饲粮中添加纤维素酶和木聚糖酶对 DM、OM、NDF 和 ADF 降解率均无影响。在本试验中，饲粮中添加复合酶制剂显著提高 DM 和 NDF 表观消化率，且随着添加剂量增加，DM、OM 和 NDF 的表观消化率呈线性增加，这可能是由于复合酶制剂能够依附于饲粮，破坏植物饲料表面的纤维结构，使饲粮释放更多的还原糖，从而提高瘤胃中木聚糖水解菌、纤维二糖利用菌等微生物的繁殖，进而提高饲粮利用率，最终促进瘤胃对营养物质的消化。

3.3　复合酶制剂对奶牛 DMI 和 FCR 的影响

提高 DMI 和 FCR 对于改善动物生产性能和降低饲养成本具有重要意义。解祥学等[28]报道，酶制剂具有降低消化道食糜黏性、增加采食量的作用。Choct[29]研究表明，饲粮中添加酶可以降低禽类消化道内食糜黏性，若酶在反刍动物上也有类似降低消化道内食糜黏性的特点，就能够增加瘤胃食糜的流通速率，使反刍动物的饱腹感减弱，从而促进奶牛采食；但如果增加食糜的流通速率，酶在瘤胃中停留时间减少，就会导致酶缺乏足够时间来降解瘤胃中纤维物质，而随瘤胃食糜排出的绝大部分酶在真胃环境中胃蛋白酶和低 pH 作用下很快失

活，因此，酶制剂的添加水平需要控制在合理的范围内[28]。在本试验中，饲粮中添加 0.10%和 0.15%的复合酶制剂能显著提高奶牛的 FCR，使 DMI 有升高的趋势，说明复合酶制剂可在一定程度上促进奶牛采食。

3.4 复合酶制剂对奶牛血清生化指标的影响

血液中 ALB、TP、UN 和 CR 含量变化共同反映了机体蛋白质代谢情况[30]。血液中 TP 主要由 ALB 和球蛋白构成，ALB 具有维持血浆的渗透压的作用，奶牛血液中 ALB 正常含量在 29.0~36.6 g/L[31]，若其长时间含量过低，则会导致机体蛋白质缺乏；血液中的 UN 主要来自于饲粮中蛋白质分解和机体蛋白质分解，当血液中 UN 含量升高时，则表示机体增强了对饲粮蛋白质的利用能力，提高了机体对蛋白质的分解作用，反之则下降，因此血液中 UN 含量变化可在一定程度上反映机体对饲粮中蛋白质的利用情况；血液中 CR 含量反映了机体蛋白质分解和肝脏中氮素循环的情况，CR 含量增加代表着机体内蛋白质分解代谢活动增强。贾仙宝[17]报道，在饲粮中添加纤维素酶制剂使血液中 TP、CR 含量显著升高，UN 含量降低，表明酶制剂能够影响参与蛋白质代谢的相关血液指标；扈添琴[33]在饲粮中添加酶制剂与植物甾醇复合物能提高 ALB 含量，但对 TP 含量没有显著影响。在本试验中，添加复合酶制剂，血清中 TP 含量有升高趋势，UN 含量有下降趋势，但未达到显著水平，这可能由于奶牛本身具有较强的自身调控能力。

TC 和 BHBA 是脂肪代谢产物，因此其含量变化可在一定程度上反映机体内脂肪代谢情况。扈添琴[32]研究发现，添加酶制剂和植物甾醇组成的复合物使奶牛血液中 TC 和甘油三酯含量降低；林静等[5]发现，在饲粮中添加外源纤维素酶对 TC、BHBA 含量均没有影响，这与本试验结果一致。

血液中的 GLU 主要来源于体内肝糖原的分解和瘤胃微生物分解饲粮中碳水化合物产生的丙酸，是机体主要的能量来源，其含量反映机体对饲粮碳水化合物消化吸收能力的强弱。奶牛 GLU 的正常含量为（3.10±0.47） mmol/L[33]。在本试验条件下，饲粮中添加复合酶制

剂对奶牛血清 GLU 含量没有显著影响，但在数值上有所提高，这与贾仙宝[17]结果一致。

3.5 复合酶制剂对奶牛生产性能的影响

产奶量直接影响了奶牛生产效益，如何添加酶制剂提高奶牛的产奶量也是当前的研究热点。林静等[5]在饲粮中添加以纤维素酶、木聚糖酶和葡聚糖酶为主的复合酶制剂饲喂奶牛，结果表明添加 10 和 20 g/(头·d)的复合酶制剂能显著提高产奶量；Yang 等[23]通过在奶牛饲粮中添加 0.1%和 0.2%的酶制剂使产奶量显著提高了 0.9 和 1.9 kg/d，4%乳脂校正乳产量显著提高了 0.5 和 2.2 kg/d，同时表明产奶量和 4%乳脂校正乳产量的提高幅度随添加量的增加而增加；而 Silva 等[34]的研究结果显示酶制剂对奶牛产奶量没有显著影响。本试验发现，饲粮中添加复合酶制剂使 0.10%组和 0.15%组的 3.5%乳脂校正乳产量比对照组显著提高，且试验组的产奶量也有增加的趋势，这可能是由于复合酶制剂促进了瘤胃发酵，提高了营养物质的表观消化率和 FCR，从而增加了产奶量和 3.5%乳脂校正乳产量。在本试验中，随着复合酶制剂量增加，3.5%乳脂校正乳产量呈二次变化，这说明 3.5%乳脂校正乳产量与复合酶制剂添加量密切相关。

乳脂、乳蛋白和乳糖含量是评价牛奶品质的关键指标。Sutton 等[35]研究发现，饲粮中添加复合酶制剂能够有效改善乳品质；Beauchemin 等[21]在饲粮中添加 1.22 和 3.67 mL/kg 的液体酶制剂饲喂奶牛，结果表明乳蛋白率显著高于对照组，分别提高了 1.82%和 2.13%；杨泽坤等[36]通过在饲粮中添加复合酶制剂饲喂奶牛发现，乳脂含量和乳蛋白率均得到显著提高；而 Arriola 等[20]报道饲粮中添加酶制剂对乳品质没有显著影响。本试验结果表明，饲粮中添加 0.10%和 0.15%的复合酶制剂使牛奶乳脂率比对照组显著提高了 7.30%和 12.70%。这可能是由于饲粮中复合酶制剂提高了瘤胃内乙酸菌和纤维分解菌等微生物的活动，瘤胃微生物活动的增强促进瘤胃液中 VFA 和乙酸的产生，而乙酸是合成乳脂的重要前体物质，因此大量乙酸的产生有利于促进乳脂合成。在本试验中，随着复合酶制剂量增加，乳脂率呈二次变化，这可能是由于复合酶制剂量与微生物总量之间存在二次变化的关系[38]，过量的复合酶制剂

反而对产奶性能有负面作用。

4 结 论

①饲粮中添加复合酶制剂有利于提高奶牛瘤胃液 TVFA 含量，并提高 DM、OM、NDF 的表观消化率。

②饲粮中添加复合酶制剂有利于提高奶牛的 FCR、3.5%乳脂校正乳产量和乳脂率，且与添加量有关，添加量为 0.15%时效果较好。

参考文献：

[1] 何立荣,李爱华.酶制剂在奶牛日粮中的研究与应用进展[J].农业科学研究,2010,31(3):59–64.

[2] 周勃,冯杰.酶制剂和乳酸菌对育肥猪生产性能和养分消化率的影响[J].饲料与畜牧,2011(2):38–40.

[3] 赵鹏,唐德富,汝应俊,等.低小麦饲粮中添加酶制剂对肉仔鸡生产性能及养分消化利用的影响[J].甘肃农业大学学报,2015,50(1):25–30.

[4] MORGAVI D P,NEWBOLD C J,BEEVER D E,et al.Stability and stabilization of potential feed additive enzymes in rumen fluid[J].Enzyme and Microbial Technology,2000,26(2/3/4):171–177.

[5] 林静,赵鑫源,都文,等.复合酶制剂对泌乳奶牛瘤胃发酵、营养物质表观消化率及生产性能的影响[J].动物营养学报,2017,29(6):2124–2133.

[6] GADO H M,SALEM A Z M,ROBINSON P H,et al.Influence of exogenous enzymes on nutrient digestibility,extent of ruminal fermentation as well as milk production and composition in dairy cows[J].Animal Feed Science and Technology,2009,154(1/2):36–46.

[7] 韩兆玉,段智勇,丁立人,等.酶制剂对奶牛产奶量和乳品质的影响[J].粮食与饲料工业,2008(8):39–40.

[8] PETERS A,LEBZIEN P,MEYER U,et al.Effect of exogenous fibrolytic enzymes on ruminal fermentation and nutrient digestion in dairy cows[J].Archives of Animal Nutrition,2010,64(3):221–237.

[9] NRC.Nutrient requirements of dairy cattle[S].7th ed.Washington,D.C.:National Academy Press,2001.

[10] 国家技术监督局.GB/T 6432–1994 饲料中粗蛋白测定方法[S].北京:中国标准出版社,1994.

[11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T 20806–2006 饲料中中性洗涤纤维(NDF)的测定[S].北京:中国标准出版社,2007.

[12] 中华人民共和国农业部.NY/T 1459–2007 饲料中酸性洗涤纤维的测定[S].北京:中国农业出版社,2008.

[13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T 6438–2007 饲料中粗灰分的测定[S].北京:中国标准出版社,2007.

[14] 王加启.反刍动物营养学研究方法[M].北京:现代教育出版社,2011.

[15] MAKKAR H P,BECKER K.Purine quantification in digesta from ruminants by spectrophotometric and HPLC methods[J].British Journal of Nutrition,1999,81(2):107–112.

[16] KEULEN J V,YOUNG B A.Evaluation of acid-insoluble ash as a natural marker in ruminant digestibility studies[J].Journal of Animal Science,1977,44(2):282–287.

[17] 贾仙宝.外源纤维酶对奶牛瘤胃发酵、消化代谢及生产性能影响的研究[D].硕士学位论文.呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.

[18] 李朝云.壳聚糖与纤维素酶对瘤胃发酵、甲烷产生及微生物区系的影响[D].博士学位论文.杨凌:西北农林科技大学,2014.

[19] 陈宇.外源酶对湖羊瘤胃发酵的影响[D].硕士学位论文.福州:福建农林大学,2016.

[20] ARRIOLA K G,KIM S C,STAPLES C R,et al.Effect of fibrolytic enzyme application to low- and high-concentrate diets on the performance of lactating dairy cattle[J].Journal of Dairy Science,2011,94(2):832–841.

[21] BEAUCHEMIN K A,COLOMBATTO D C,MORGAVI D P,et al.Use of exogenous fibrolytic enzymes to improve feed utilization by ruminants1,2[J].Journal of Animal Science,2003,81(14 Suppl.2):1061–1074.

[22] 呼和,金海,薛淑媛,等.外源纤维酶对奶牛瘤胃纤维降解细菌影响的研究[J].畜牧与饲料科学,2011,32(5):25–28.

[23] YANG W Z,BEAUCHEMIN K A,RODE L M.Effects of an enzyme feed additive on extent of digestion and milk production of lactating dairy cows[J].Journal of Dairy Science,1999,82(2):391–403.

[24] HRISTOV A N,MCALLISTER T A,CHENG K J.Effect of dietary or abomasal supplementation of exogenous polysaccharide-degrading enzymes on rumen fermentation and nutrient digestibility[J].Journal of Animal Science,1998,76(12):3146–3156.

[25] HRISTOV A N,MCALLISTER T A,CHENG K J.Stability of exogenous polysaccharide-degrading enzymes in the rumen[J].Animal Feed Science and Technology,1998,76(1/2):161–168.

[26] 徐学文,刘正亚,田雯,等.不同的复合酶制剂对奶牛生产性能和营养物质消化率的影响[J].粮食与饲料工业,2012,12(11):51–54.

[27] KNOWLTON K F,TAYLOR M S,HILL S R,et al.Manure nutrient excretion by lactating cows fed exogenous phytase and cellulase[J].Journal of Dairy Science,2007,90(9):4356–4360.

[28] 解祥学,杜红方,陈书琴,等.外源酶制剂在反刍动物上的应用与展望[J].动物营养学

报,2016,28(4):1011–1019.

[29] CHOCT M.Enzymes for the feed industry:past,present and future[J].World’s Poultry Science Journal,2006,62(1):5–16.

[30] YANG L L,LV Y Y,SUN G Q.Effect of brewer’s grains on milk production and blood biochemical parameters of dairy cows[J].Chinese Animal Husbandry and Veterinary Medicine,2014,50(13):51–56.

[31] 宋平.不同饲养方式下奶牛血液生化指标测定与分析[D].硕士学位论文.哈尔滨:东北农业大学,2007.

[32] 扈添琴.日粮中添加不同水平酶制剂与植物甾醇复合物对奶牛生产性能和血液指标的影响[D].硕士学位论文.南京:南京农业大学,2013.

[33] 吕超.粗饲料组合对奶牛氮磷排放的影响及农田承载力研究[D].硕士学位论文.郑州:河南农业大学,2012.

[34] SILVA T H,TAKIYA C S,VENDRAMINI T H A,et al.Effects of dietary fibrolytic enzymes on chewing time,ruminal fermentation,and performance of mid-lactating dairy cows[J].Animal Feed Science and Technology,2016,221:35–43.

[35] SUTTON J D,PHIPPS R H,BEEVER D E,et al.Effect of method of application of a fibrolytic enzyme product on digestive processes and milk production in Holstein-Friesian cows[J].Journal of Dairy Science,2003,86(2):546–556.

[36] 杨泽坤.反刍动物专用复合酶制剂对奶牛瘤胃发酵、血液指标及生产性能的影响[D].硕士学位论文.杨凌:西北农林科技大学,2017.

[37] NSEREKO V L,BEAUCHEMIN K A,MORGAVI D P,et al.Effect of a fibrolytic enzyme preparation from *Trichoderma longibrachiatum* on the rumen microbial population of dairy cows[J].Canadian Journal of Microbiolog,2002,48(1):14–20.

Effects of Compound Enzyme Preparation on Rumen Fermentation, Apparent Digestibility of Nutrients and Performance of Lactating Cows

ZHAO Liansheng[1,2] WANG Youyue[3] CHEN Yakun[2] BU Dengpan[2,4] LIU Wei[2] GUO Jiangpeng[5*]

(1. Faculty of Animal Science and Technology, Gansu Agricultural University, Gansu 730070*, China; 2. State Key Laboratory of Animal Nutrition, Institute of Animal Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing* 100193*, China; 3. Beijing Animal Husbandry Environment Monitoring Station, Beijing* 102200*, China; 4. Beijing General Station of Animal Husbandry, Beijing* 100107*, China*）

Abstract: This experiment was conducted to investigate the effects of different doses of compound enzyme preparation on rumen fermentation, apparent digestibility of nutrients, serum biochemical indices and performance of lactating cows. Thirty-two healthy Holstein lactating cows were selected with similar body weight, parity, lactation days and milk yield. The cows were allocated to 4 groups according to randomized blocks experiment design. Dairy cows in control group were fed a basal diet, while those in trial groups were fed the basal diet with 0.10%, 0.15% and 0.20% compound enzyme preparation, respectively. Preliminary trial period was 10 days, and formal trial period was 56 days. The results showed as follows: 1) compared with the control group, adding 0.15% compound enzyme preparation in the diets significantly increased total volatile fatty acids content of rumen fluid ($P<0.05$) and adding compound enzyme preparation had a trend to increase acetic acid content （$P=0.08$）, but had no significant effects on other volatile fatty acids, ammonia nitrogen and micro protein contents ($P>0.05$). 2) Compared with the control group, adding

compound enzyme preparation in the diet significantly increased the apparent digestibility of dry matter and neutral detergent fiber ($P<0.05$), and adding 0.20% compound enzyme preparation significantly increased the apparent digestibility of organic matter ($P<0.05$). 3) Compared with the control group, adding compound enzyme preparation in the diet had a trend to increase serum albumin content （$P=0.09$） and decrease urea nitrogen content （$P=0.07$）, but had no significant effects on other serum indexes ($P>0.05$). 4) Compared with the control group, adding 0.10% and 0.15% compound enzyme preparation in the diet significantly increased feed conversion rate ($P<0.05$), and the 3.5% fat correction milk yield in 0.10% and 0.15% groups was increased by 3.88 and 4.27 kg/d ($P<0.05$), respectively. The milk fat rate in 0.15% group was increased by 12.70% ($P<0.05$). In conclusion, adding compound enzyme preparation in the diet can improve feed conversion rate, rumen fermentation and performance. Comprehensive consideration, the recommended adding amount of compound enzyme preparation in the diet of lactating cows is 0.15%.

Key words: compound enzyme preparation; lactating cows; apparent digestibility; performance; serum biochemical indices

*Corresponding author, senior engineer, E-mail: guojp72@163.com (责任编辑 陈 鑫)